

博士論文 (要約)

古典非線形フィードフォワードと
非ガウス型補助状態を用いた
非ガウス型量子測定の実現

阪口 淳史

研究の背景

ムーアの法則にしたがう指数的な計算速度の増大に限界が見えつつあるなか、量子的な特性を活かしてある種の計算を非常に高速に行える、量子コンピュータが注目を集めている。光は、高い量子化エネルギーを持ち、また通信との互換性が非常に高いという特徴から、量子コンピュータのハードウェアとして注目されている。

中でも光の直交位相振幅に着目した連続量量子計算は、クラスター状態と呼ばれる大規模なエンタングルメント状態を比較的簡単に生成できることから、それに対する測定及びフィードフォワードによる演算（一方向量子計算）を実装するプラットフォームとして有望視されている。特に、時間領域に局在した波束モードに着目した時間領域多重の方法を用いると、プログラマブルかつスケラブルな演算が可能であるため実験的にも着目されており、連続量のクラスター状態の生成や、それに対する操作が実験的に実現されている。

一方、光の連続量量子計算を行う上でネックになっているのが、ガウス型操作しか実現されていないという点である。連続量の量子情報処理における操作は、ハミルトニアン の次数によって2次以下のガウス型操作、3次以上の非ガウス型操作に分類される。任意の量子操作を行うには、任意のガウス型操作に加えて、非ガウス型の操作が少なくとも一つ必要になることが知られている。更に、クラスター状態とガウス型操作だけでは従来の計算機で効率的にシミュレートできてしまうことから、残る非ガウス型操作の実現こそが最大の課題である。

非ガウス型操作は高次の非線形光学効果に対応し、微弱な光の量子状態に対して、十分な効果を得るのは難しい。この問題にも、オフラインで用意した非ガウス型補助状態（3次位相状態と呼ばれる）を用いて、測定およびフィードフォワードによる演算を行う、測定誘起の手法により回避することができるという提案があった。近年この理論を改良し、3次位相ゲートと呼ばれる非ガウス型操作を、ある特定の非ガウス型測定と変位操作により実現する提案がなされた。一方向量子計算においては、非ガウス型操作は非ガウス型の測定によって実現されるが、この提案では、3次位相ゲートに必要な非ガウス型測定を、非ガウス型の補助状態と線形なホモダイン測定及び非線形な演算を含むフィードフォワードにより実装できることを示している。この理論に前後して、測定誘起の手法によって3次位相ゲートを実現するための様々な要素技術の開発が行われたが、まだ3次位相ゲートを実装できる非ガウス型測定は実現されていなかった。

研究の概要

本研究では、測定誘起の手法による3次位相ゲートの中核である、3次位相状態への射影測定に相当する非ガウス型測定の実装を初めて行った。3次位相状態の最低次の近似である0と1光子の重ね合わせ状態と、古典的な非線形フィードフォワードを用いて、量子的な非ガウス型測定に成功した。

直交位相振幅をリアルタイムに測定可能な非ガウス型補助状態の生成

時間領域に局在する波束モードに対しては、測定及びフィードフォワードを用いた操作を素早く行うことが重要である。というのも、測定及びフィードフォワードに対して操作を受ける波束全体のタ

イメージを合わせる必要があり、その遅延が大きい場合、長大な光学遅延路が実験系を不安定にしてしまうからである。本章では、先行研究で開発された、直交位相振幅をリアルタイム測定可能な非ガウス型状態の生成手法に基づき、アナログ電気フィルターで高速に直交位相振幅を取り出せる「指数増大型」と呼ばれる形状で、かつ時間幅 18.2 ns の波束モードに、真空場と単一光子の重ね合わせ状態を生成した。この重ね合わせ状態は、適切な重ね合わせ係数の下で理想的な非ガウス型補助状態の低次の近似状態となる。

更に、生成する状態の重ね合わせ係数を変化させ、補助状態の不完全性に由来する非線形なノイズ項の評価を詳細に行った。その結果、高速に扱える波束モードにおいて、任意のガウス型状態及びその混合よりも、ノイズ項を抑制できる補助状態の生成に成功したことを実際に確認できた。この特性を本論文では非線形スキージングと呼び、3 次位相ゲートを構成する量子的な非ガウス型測定を実現する上で不可欠な性質である。次の実験では、実際に生成した重ね合わせ状態を非ガウス型測定の補助状態として用いた。

非線形フィードフォワードを用いた非ガウス型量子測定の実現

3 次位相ゲートを構成する非ガウス型測定は、非ガウス型補助状態と非線形な演算を含むフィードフォワードにより実装できる。これまで、3 次位相ゲートの要素技術として外部からの電気信号に基づく非線形フィードフォワードを実現する回路は作成されたが、実際に非ガウス型補助状態を用いて、量子状態の測定結果をもとに非線形フィードフォワードを行った研究は初めてである。

波束モードに対する非線形フィードフォワードでは、波束モードの直交位相振幅を取り出した後に非線形演算を行い、その値を一定期間ホールドする必要がある。このような非線形性の強い処理には、デジタル回路が適している。よって、先行研究で開発された、低レイテンシなアナログ・デジタル間の変換と FPGA を用いた信号処理回路を用いた。

また、時間幅の短い波束モードに入った量子状態は、到来する時刻に合わせて直交位相振幅の値を取得しなければ状態の情報が失われてノイズが加わってしまうから、タイミングの精度が重要である。波束の到来の瞬間の値を捕まえてフィードフォワードに用いるノウハウは無かったため、本研究で新たに FPGA(Field Programmable Gate Array) の可変遅延機能を用いて高精度に波束の到来タイミングを判別する仕組みを実装した。これにより、時間幅の短い波束モードに入った非ガウス型補助状態を非線形フィードフォワードに導入することができた。

実装した測定では、真空場の被測定状態に対して、ガウス型状態の限界よりも測定の分散を減らせることを示し、低次の非ガウス型補助状態の僅かなノイズ抑制効果を、実際に活かした測定になっていることを確かめた。更に、測定自体のより詳細な検証として、測定を表す POVM をトモグラフィして評価した。その結果、POVM 要素同士は測定値に対応する平行移動でほぼ一致する、POVM 要素に対応する量子状態が非線形スキージングしている、という期待された性質が示された。非線形フィードフォワードを用いた非ガウス型量子測定に成功していることの明確な証拠であり、測定値に対応する平行移動で、特定のガウス型状態を決定論的に非ガウス型状態へと移せることを意味するから、この測定を用いて決定論的な非ガウス型操作を構成できることも示された。

結論

以上の成果をまとめると、本研究では、3 次位相ゲートの中核をなす直交位相振幅の非線形な項に対する測定を実験的に実装し、その量子的な非ガウス性を実証した。また、実装した非ガウス型測定とその測定値による変位操作のみで非ガウス型操作が可能であることを示した。

本研究の成果により、これまでガウス型の測定とガウス型の操作で構成されていた連続量変数のスキームにおいて、非ガウス型測定というユニバーサルな量子操作に必要な要素が出そろった。また、本研究で使用したフィードフォワードの技術は、3 次位相ゲート以外の量子操作にも応用でき、今後は要素技術、特に補助状態の生成方法を高精度化することによって、誤り訂正可能なユニバーサルな量子計算の実現につながる。